

微喷管内流动和换热的数值模拟与分析

王沫然, 陈泽敬, 李志信

(清华大学工程力学系传热强化与过程节能教育部重点实验室, 北京 100084)

E-mail: moralwang99@mails.tsinghua.edu.cn

摘要: 发展了直接模拟 Monte Carlo 方法的压力边界条件处理方法, 并使用这种方法对微型拉法尔喷管内的气体流动特性进行了数值模拟与分析。研究了两种构型的拉法尔喷管, 对比了相同出口压力不同入口压力下的流场特性, 以及在相同入口压力时真空压力条件和给定低压边界条件对流场的影响。

关键词: 微喷管; 数值模拟; 直接模拟 Monte Carlo

中图分类号: TK16 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-4776(2003) 07/08-0061-04

Simulation and analysis for gas flow and heat transfer in micro nozzle

WANG Mo-ran, CHEN Ze-jing, LI Zhi-xin

(Key Lab of Education Ministry of Heat Transfer Enhancement and Energy Conservation,
Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The pressure boundary implement for the direct simulation Monte Carlo method is developed, with which the gas flows in micro Laval nozzles is numerically simulated and analyzed. Two types of micro Laval nozzles geometries are studied. The flow characteristics under different outlet pressure boundaries with the same inlet pressure were compared. The effect on the flow field of outlet boundary was investigated, under vacuum outlet and a given low pressure outlet boundary condition.

Key words: micro nozzle; numerical simulation; direct simulation Monte Carlo

1 引言

微型喷管在航天器推进系统以及其他 MEMS 动力系统中有很重要的应用背景, 如在微小卫星的姿态控制系统中, 使用数字阵列式的微型喷管推进器可以准确有效地按要求调整卫星的姿态方位^[1,2]; 在喷墨打印机的喷头上, 微喷管可以用来使墨粉获取更高的速度以提高打印效率^[3]。但是由于通常情况下气体在喷管内的流动过程中流动状态会发生剧烈的变化, 同时会伴随着流动和换热耦合问题, 因此对喷管内流动和换热的分析一直是热点和难点问题^[4,5]。与传统的喷管相比, 微型喷管的特征尺寸减小, 且在流动方向上不断变化, 从而造成

气体在微喷管内的流动可能跨越几个流区, 即连续区、滑移区、过渡区及自由分子流区。经典滑移理论指出, 处在连续区和滑移区的气体流动尚可以通过传统的连续介质方程加滑移修正得到精确模拟, 而对于过渡区和自由分子流区的气体, 传统的模拟方法几乎无效^[6]。微型喷管内的气体流动可能是跨声速跨流区的流动, 传统的基于连续介质假设的 CFD 模拟结果与实验结果相比存在较大的误差^[3], 需寻求新的模拟方法。

直接模拟蒙特卡罗法 (DSMC) 是一种基于分子运动理论和统计规律的流体计算方法^[7], 它通过分子运动和分子碰撞在一定条件下的解耦处理, 从而实现了对流体行为的有效模拟。本文使用 DSMC 方

收稿日期: 2003-05-15

基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目 (59995550-2); 国家重点基础研究发展规划项目 (G1999033106)

法对几种典型构形的拉法尔喷管在不同压差下的流动和换热特性进行了模拟,并与传统 CFD 模拟结果进行了对比和分析。

2 数值方法

2.1 DSMC 方法介绍

直接模拟 Monte Carlo 方法是一种基于分子运动和统计规律、用来模拟稀薄气体流动的数值方法。它通过计算成千上万的模拟粒子的运动和碰撞再现了气体分子的运动过程,使气体流动的动力学方程得到求解。在模拟过程中,每个模拟粒子代表大量的真实气体分子,在分子混沌和气体稀薄的基本假设条件下,只考虑粒子间的二元碰撞,从而当计算时间步长小于物理碰撞时间时,分子的运动与分子间碰撞可以解耦。同时,在粒子运动、粒子间碰撞及粒子与边界间相互作用时保持动量和能量的守恒。

在仿真的开始阶段,所有的粒子都被均匀地随机分布到网格中,在每个时间步中,粒子先以各自的速度平移一小段距离,并完成与边界的可能碰撞,然后粒子按一定顺序标号。在每个网格中,根据一定的原则选取“碰撞对”,并计算粒子碰撞后的速度分量。通用的选取方法是无时间计数器(NTC)方法。流动的宏观特性通过统计规律采样计算得到。重复上述步骤直到统计误差足够小。

时间步长的选取应保证小于粒子平均碰撞时间。本文借鉴传统 CFD 的做法,定义一个 CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) 数,需要保证

$$CFL = \frac{C_m t}{x} < 1 \quad (1)$$

其中, C_m 为分子的最可几速度, x 为网格长度, t 为时间步长。在本文的模拟中, CFL 数的值取为 0.2。

固壁采用等温边界条件,模拟粒子与壁面碰撞采用完全散射模型。在这种模型下,热协调系数与动量协调系数都为 1。

流场的宏观物理特性可以通过如下的统计公式计算得到

$$= nm \quad (2)$$

其中 n 为分子数密度, m 为分子质量。

$$T = (3 T_{tr} + T_{rot}) / (3 +) \quad (3)$$

其中 T_{tr} 代表平动温度, T_{rot} 代表转动温度, 为内能自由度, 振动温度被忽略。平动温度和转动温度由下面公式计算

$$T_{tr} = 2 \left[\overline{mv^2} - \overline{m(\bar{v})^2} \right] / 3k \quad (4)$$

$$T_{rot} = \frac{2}{k} \left(\overline{rot} \right) \quad (5)$$

其中 \bar{v} 为分子的速度, k 为 Boltzman 常数, rot 为单个分子的转动能。

根据完全气体的状态方程,气体的压力为

$$P = RT = nkT \quad (6)$$

2.2 边界条件实现

标准的 DSMC 程序使用的是速度边界条件,即给定出入口处的气体速度及入口处的数密度,然而在微尺度气体流动研究中,气体的速度和数密度很难在实验中确定,一般可以比较准确测量的量有出入口压力及气体入口温度,这几个量可以统称为压力边界条件。Piekos 等人^[8]和 Nance 等人^[9]在入口处使用“通量法”来确定进入流场粒子的速度,这种方法明显的缺点是随机扰动可能造成计算的发散; Liou 等人^[10,11]提出使用入口截面处各单元速度的统计量作为新粒子的速度分布量,这种方法简单易行,但收敛速度比较慢。本文提出在入口处采用类似传统 CFD 的压力边界处理方法,即

$$(u_{in})_j + \frac{P_{in} - P_j}{j a_j} \quad (7)$$

$$(v_{in})_j = v_j \quad (8)$$

$$n_{in} = \frac{P_{in}}{k T_{in}} \quad (9)$$

其中 j 是边界单元的坐标,下标 in 表示入口边界。

同样的方法应用到出口处,则有

$$(u_{out})_j = v_j + \frac{P_{out} - P_j}{(a_j)^2} \quad (10)$$

$$(u_{out})_j = u_j + \frac{P_j - P_{out}}{p_j a_j} \quad (11)$$

$$(v_{out})_j = v_j \quad (12)$$

$$(T_{out})_j = p_{out} / [(u_{out})_j R] \quad (13)$$

$$n_{out} = p_{out} / m \quad (14)$$

其中 a_j 是当地声速,下标 out 表示边界。

公式(7)~(14)实现了压力边界条件向标准 DSMC 边界条件的转化。

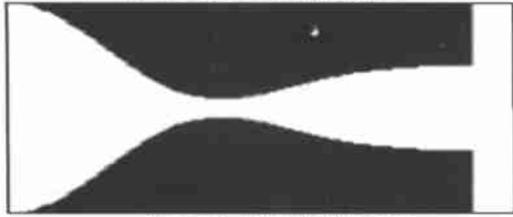
3 结果分析

本文对如图 1 所示的两种有代表性构型的拉法尔喷管进行了模拟,一种是出口尺寸大于入口尺寸的喷管,另一种是入口尺寸大于出口尺寸的喷管。两种喷管的几何构型数据取自于加工样品的实际测量值(样品由清华大学精密仪器系设计,由北京大学微电子所加工),计算中采用 7 次多项式拟和曲线。为了节约计算量,两构型均采用等比例缩小,且根据对称性只计算一半区域。

对于(a)构型,我们探讨了相同出口压力下进口压力对流场的影响。出口压力取为 0.5 个大气压,



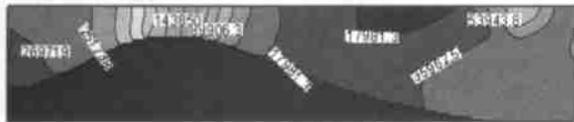
(a) 出口大于入口类型的喷管



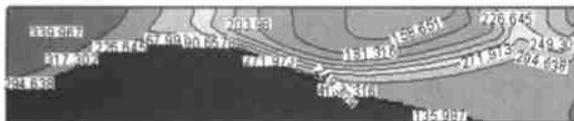
(b) 入口大于出口类型的喷管

图1 两种不同构型的微型拉法尔喷管

进口压力对比了 2.65 个大气压和 1.33 个大气压的情况。按照经典一维拉法尔喷管理论,两种情况下的气体流动在喉部达到音速,在喉部下游都为超音速流动。计算结果如图 2 和图 3 所示。图 2 为进口



(a) 压力等值图



(b) 温度等值图



(c) 马赫数等值图

图2 进口压力为 2.65 大气压时的结果



(a) 压力等值图



(b) 温度等值图



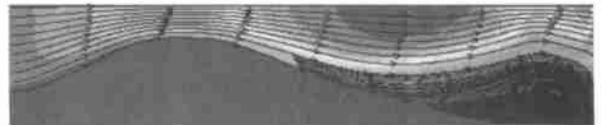
(c) 马赫数图

图3 进口压力为 1.33 大气压时的结果

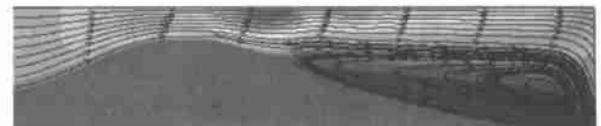
压力 2.65 个大气压时的压力、温度、马赫数的等值线图,图 3 为进口压力 1.33 大气压时的结果。两个结果表明,与传统一维理论分析相同的是,两种情况

下气体在喉部下游都出现了超音速区,所不同的是,达到音速的位置不是在喉部,而是在喉部下游的某个位置,另外,超音速区只在喉部下游一定区域内出现,之后气体还原为亚音速流动。

考察气体的流场,如图 4 所示,气体在喉部下游产生回流区,从而使得气体动能耗散,超音速气流又恢复到亚音速流动,这种情况对微型喷管的性能产生负面影响,是需要避免的工况。对比图 4 (a) 和 (b),入口压力越大,出口马赫数越大,回流区越小,越有利于喷管的喷射。图 4 中还可以观测到在喉部下游轴线上“超音速环”的存在,其存在机理还需要进一步研究。



(a) 入口压力 2.65 大气压时的流线图



(b) 入口压力为 1.33 大气压时的流线图

图4 背景为速度等值图的不同入口压力下的流线图

对于构型(b),本文讨论了固定入口压力,改变出口压力边界的情况。设入口压力为 1.85 个大气压,出口压力分别为 0.5 大气压和真空边界。真空边界是为了模拟喷管向太空喷射的情况,由于出口处会产生膨胀波,因此其出口压力不等于 0。图 5 为模拟得到的马赫数等值图。当出口压力为 0.5 大气压时,如图 5 (a) 所示,其结果在定性上与前面模拟相同,超音速气流被回流耗散掉;而当出口为真空条件时,如图 5 (b) 所示,喉部下游没有回流区,出口



(a) 出口压力为 0.5 大气压下的流场马赫数等值图



(b) 出口压力为真空条件下的流场马赫数等值图

图5 不同出口压力边界条件的结果

处仍然可以保持超音速流动,但与传统理论分析和二维无粘 N - S 方程模拟结果^[4]不同的是,在喉部下游的截面上,速度存在较大的梯度,在接近壁面处气体速度很小,其原因是气体粘性所致。在喷管出口处的马赫数等值线形成的斜直线实际上就是膨胀波的波面。

4 结 论

模拟结果表明,对于相同出口压力不同入口压力的喷管流动,与传统的一维喷管理论分析结果不同的是,微喷管中流动出现音速的位置不是恰好在喉部,而是在喉部稍稍靠后一点;喉部后段在高压差比的条件下的确会出现超音速区,但这种超音速区会在很小的范围内耗散掉,出口处一般处于亚音速流动状态;在喷管扩张段有明显的回流区的存在,这可能是超音速耗散的主要原因;另外,在模拟中还可以观测到“超音速环”现象,其机理还需要进一步探讨。对于相同入口压力,对比了真空边界条件和给定低压条件的流动,结果表明两种情况下的流动状况有明显的不同,真空条件下在喉部下游不会产生回流区,出口仍然可以保持超音速流,出口处会产生膨胀波。

参考文献:

[1] LEWIS D H J, JANSON S W, COHEN R B, *et al.* Digital micro propulsion [A]. The 12th IEEE Int Conf on Micro Electro Mechanical Systems [C]. 1999, 517-522.
[2] 唐飞,叶雄英,周兆英. 微推进器现状及发展 [A]. '98 航天高技术青年学术讨论会论文集 [C]. 中国,黄山,1998.
[3] LEE S W, KIM H C, KEON K, *et al.* Monolithic inkjet print

head: DomeJet [A]. 14th IEEE Int Conf on Micro Electro Mechanical Systems [C]. 2001, 515-18.

[4] 王沫然,陈泽敬,李志信. 微型拉法尔喷管内气体流动的数值模拟 [J]. 压电与声光, 2001, 23: 207-209.
[5] BAYT R L. Analysis, fabrication and testing of a MEMS - based micropropulsion System [D]. Ph D Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 1999.
[6] KARNIADAKIS G E, BESKOK A. Micro flows: fundamentals and simulation [M]. Germany, Springer, 2002.
[7] BIRD G A. Molecular gas dynamics and the direct simulation of gas flows [M]. Clarendon Press, 1994.
[8] PIEKOS E S, BREUER K S. Numerical modeling of micro-mechanical devices using the direct simulation Monte Carlo method [J]. Journal of Fluids Engineering Transactions of the ASME, 1996, 118: 464-469.
[9] NANCE R P, HASH D B, HASSAN H A. Role of boundary conditions in Monte Carlo simulation of MEMS devices [J]. Journal of Thermalphysics and Heat Transfer, 1998, 12: 447-449.
[10] LIOU W W, FANG Y. Implicit boundary conditions for direct simulation Monte Carlo method in MEMS flow predictions [J]. Computer Modeling in Engineering & Science, 2000, 4: 119-128.
[11] FANG Y, LIOU W W. Computations of the flow and heat transfer in microdevices using DSMC with implicit boundary conditions [J]. J of Heat Transfer Transactions of ASME, 2002, 124: 338-345.

作者简介:

王沫然 (1977-),男,吉林省吉林市人,清华大学工程力学系,博士研究生,主要从事 MEMS/ NEMS 中的流动和换热机理研究;

陈泽敬 (1968-),男,福建古田人,清华大学工程力学系,讲师,主要从事传热强化实验、玻璃窑炉数值模拟与航天器地面模拟等研究;

李志信 (1947-),男,河南新乡人,清华大学工程力学系,教授,博士生导师,主要从事强化换热、微尺度流动和换热研究。